

# 两次夏季江淮气旋的动能平衡过程 及其与大尺度环流的关系\*

侯定臣

(南京气象学院)

## 提 要

本文用准拉格朗日方法计算了两例夏季江淮气旋各个阶段的动能收支及旋转风、辐散风对动能制造项的贡献,并讨论了它们与大尺度环流的关系。主要结论有:(1)气旋区域动能平衡的特点随大尺度环流改变;(2)动能的水平输送取决于气旋和高空急流中心的相对位置;(3)稳定少动的高空急流入(出)口区有较强的旋转风动能制造(消耗),与水平输送项反号,移动快的急流附近,此项数值较小;(4)发展的气旋波,高层和低层有较强的辐散风动能制造;(5)夏季江淮气旋波转化为温带气旋时,高层表现为动能输入,高空急流转为气旋式弯曲。

## 一、引 言

夏季我国江淮流域常有气旋性扰动发生。对这类系统的动能收支,虽有作者做过计算<sup>[1]</sup>,但对不同结构的个例及同一个例各个阶段,还未有过系统的比较;动能平衡与大尺度环流的关系也有待进一步研究。本文通过对两个不同结构的夏季江淮气旋动能平衡的计算,对上述问题做初步探讨。

## 二、计算公式、资料处理和个例概况

考虑地形的准拉格朗日动能收支方程是

$$\frac{\delta}{\delta t} \left\{ \frac{1}{g\alpha} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} \frac{1}{2} V^2 d p d \sigma \right\} = \frac{1}{g\alpha} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} - \nabla \cdot \left( \frac{1}{2} V^2 \vec{V}_r \right) d p d \sigma + \frac{1}{g\alpha} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} - \frac{\partial(\omega V^2/2)}{\partial p} d p d \sigma \\ + \frac{1}{g\alpha} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} - \vec{v} \cdot \nabla \Phi d p d \sigma + R_{\omega} + \frac{1}{g\alpha} \int_{\sigma_A}^{\sigma_B} \frac{1}{2} V^2 \frac{\delta p_2}{\delta t} d \sigma$$

式中  $\vec{v}_r = v - \vec{c}$ ,  $\vec{c}$  为计算区域中心的移速;左侧为区域平均的动能变化率,右边前三项依次为动能的水平输送、垂直输送和内部动能源汇,即空气质点穿越等压线引起的动能制造和消耗; $R_{\omega}$ 是余项,包括了动能耗散,次网格尺度的作用以及观测和计算误差;最后一项

本文 1990 年 8 月 19 日收到,1991 年 8 月 5 日收到再改稿。

\* 本文为国家自然科学基金资助项目。

是气柱厚度变化引起的动能变化, 只有当所考虑的气柱下界在地面时即  $p_0 = p_s$ , 该项才不为 0。本文取  $1000 \times 1000 \text{km}^2$  的正方形作为计算区域, 中心与 850hPa 上的低压中心重合。

使用每天两次的探空资料, 先用一种基于三阶样条曲面拟合并有一定平滑作用的客观分析方法<sup>[2]</sup>, 把各要素内插到格距为 100km, 垂直间隔 50hPa 的网格上, 再用运动学方法计算垂直速度, 并用 O' Brien 方法订正, 同时修正水平风速, 从而得到运动学上一致的三维速度场, 然后采用中央差分计算动能平衡方程中的各项。

选用 1979 年 7 月 1—4 日和 1984 年 6 月 12—15 日两次过程。气旋的生命史和空间结构, 作者已另文讨论<sup>[3][4]</sup>。概括地说, 1979 年 7 月的个例(下面简称个例 I)可分为两个阶段: 生成阶段(1 日 08 时—2 日 20 时)和东移阶段(3 日 08 时—4 日 08 时); 1984 年 6 月的个例(简称个例 II)可分为: 生成(12 日 08 时—13 日 08 时), 东移(13 日 20 时—14 日 20 时)和发展(15 日 08 时—20 时)三个阶段。两个个例相比, 个例 II 的气旋强度大, 垂直伸展较高, 东移阶段缓慢加深, 到发展阶段则加深为典型的温带气旋。

为便于讨论, 把计算结果在时间上对各个个例的各个阶段取平均, 在垂直方向上对低层(地面—700hPa), 中层(700—400hPa)和高层(400—100hPa)分别积分。这样也可以部分消除观测和计算误差。

### 三、动能和动能平衡

表 1 为两个个例地面到 100hPa 整层积分的总动能。由表 1 知, 整层积分的动能不超过  $15 \times 10^5 \text{Jm}^{-2}$ , 远小于 1979 年亚洲冬季风期间合成气旋<sup>[5]</sup>的  $33 \times 10^5 \text{Jm}^{-2}$ , 与谢安<sup>[1]</sup>计算的梅雨期扰动的动能( $13.6 \times 10^5 \text{Jm}^{-2}$ )相当。一般来说, 夏季江淮气旋是出现在副热带急流南侧、副高下方的微弱扰动, 因而动能也较小。

表 1 区域平均的整层动能( $10^5 \text{Jm}^{-2}$ )

1979.7(I)	1 日 20h	2 日 08h	2 日 20h	3 日 08h	3 日 20h	4 日 08h		
总动能	8.1	9.5	9.6	10.8	12.3	13.9		
1984.6(II)	12 日 08h	12 日 20h	13 日 08h	13 日 20h	14 日 08h	14 日 20h	15 日 08h	15 日 20h
总动能	15.2	10.9	9.0	8.7	8.8	6.6	7.8	8.5

分析表明, 区域平均的动能并不能反映气旋波的强度及其变化。较强的个例 II, 除生成阶段的第一、二个时次外, 其过程平均的动能均小于个例 I。在气旋的东移阶段, 强度减弱的个例 I 动能不断增加, 而缓慢加深的个例 II 则动能有所减小。分析动能的垂直分布(图 1), 可以发现: 个例 II 中层动能很小, 400hPa 以上突然增加; 个例 I 中动能从 700hPa 向上逐渐增加, 因而中层动能显著大于个例 II。由系统的结构分析(文献[4])可知, 个例 I 中的气旋波上空, 是贯穿整个对流层的西风急流, 仅在低层有东风, 中层为强西风带, 因此, 动能的增大对应西风的增强和扰动的减弱; 而个例 II 气旋波附近, 有高空和中低空两支急流存在, 高空急流下方和中低空急流上方有深厚的东风, 计算区域包括了东西风带之间的弱风速区, 因而动能较小, 且当气旋加深时会表现为动能减小。

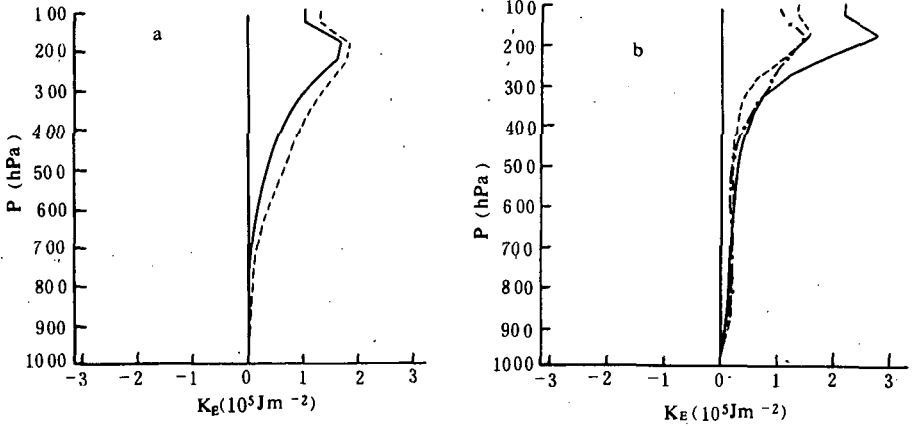


图1 动能垂直分布 (a)个例 I (b)个例 II  
(实、点、虚线分别表示生成、东移、发展阶段)

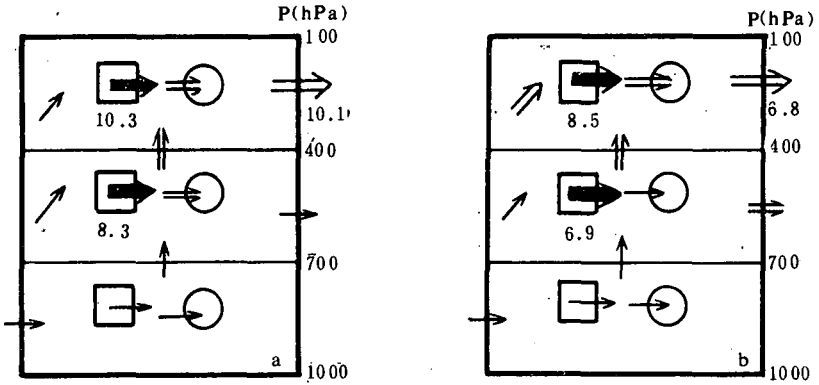


图2 个例 I 生成(a), 东移(b)阶段各层动能平衡示意图(穿越边界的箭头表示动能输送; 穿越小方框(动能制造)和圆圈(余项)的箭头表示动能源(向外)汇(向内), 斜升(降)箭头表示动能积累(减小)  
单、双、粗箭头分别为 0-2, 2-5 和  $>5 \text{ Wm}^{-2}$ , 数字表示大项的量值)

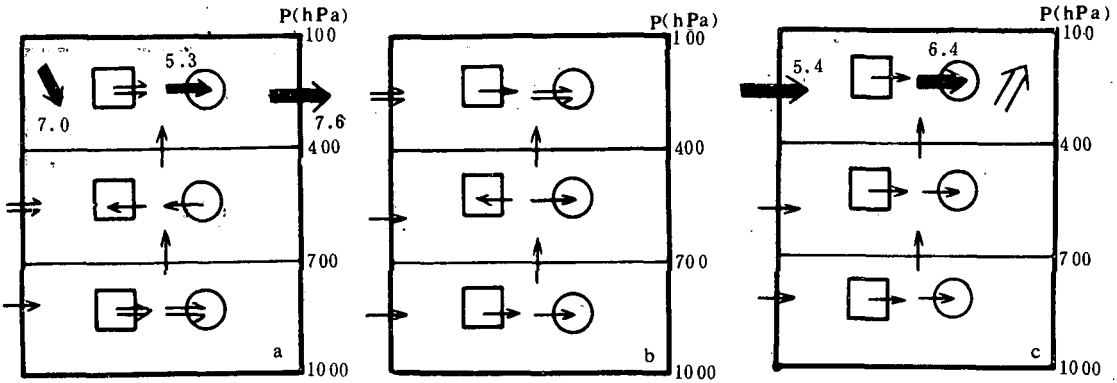


图3 个例 II 生成(a)东移(b)和发展(c)阶段动能平衡示意图(说明同图2)

图 2 和图 3 分别表示个例 I、II 各层动能平衡情况。个例 I 中两个阶段的动能平衡基本一致(图 2), 即动能制造主要为向外输送所平衡。由于输出主要发生在高层, 因而从中层到高层有较强的垂直输送。个例 II 的三个阶段, 其动能平衡各不相同, 生成阶段为“衰减—输出”型, 东移阶段为“弱输入”型、发展阶段则为“输入—积累”型(图 3)。这些阶段性特征在高层表现尤为突出。

#### 四、动能制造及其正压、斜压分量

两个个例中动能制造项的垂直分布明显不同: 个例 I 中整层为正且向上单调增加(图 2a、4a); 个例 II 中的生成阶段, 在对流层高层和低层各有一个正的最大值(图 3a、4d), 与典型温带气旋中的情况<sup>[5]</sup>类似。东移和发展阶段, 该项数值很小, 但仍具有上述特征(图 4d)。整层积分的数值, 个例 II 远小于个例 I, 即使在生成阶段, 也不超过  $7\text{Wm}^{-2}$ , 约为个例 I 的三分之一。很显然, 动能制造项也不能反映系统的强弱和变化情况。

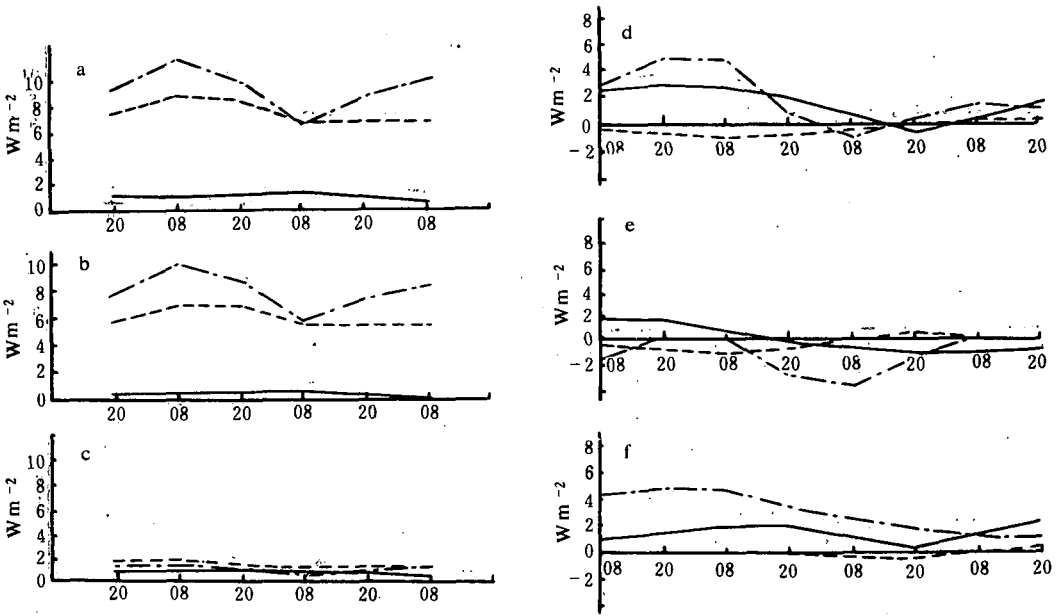


图 4 个例 I, II 动能制造(a)(d)正压(b)(e)和斜压(c)(f)分量随时间的变化  
(实线、虚线、点划线分别表示低、中、高层)(单位  $\text{Wm}^{-2}$ )

由于水平风速可分解为旋转风和辐散风两部分, 穿越等压线的动能制造也可分解为旋转风和辐散风的贡献。Pearce<sup>[6]</sup>把它们叫做正压分量和斜压分量。它们随时间的变化如图 4 所示。个例 I 中, 两者均为正, 但正压分量的整层积分始终在  $12\text{Wm}^{-2}$  以上, 其贡献超过四分之三。斜压分量数值小, 均匀分布在上中下各层, 随时间无明显变化。

个例 II 中, 斜压分量比个例 I 大得多, 整层积分可达  $6\sim 7\text{Wm}^{-2}$ , 且主要集中在上、下两层, 中层几乎为零。后期数值略小, 但仍有  $4\sim 5\text{Wm}^{-2}$ 。正压分量有明显阶段性变化, 有较大负值, 东移阶段高层达  $-4\text{Wm}^{-2}$ 。高层和低层的动能制造主要是辐散风的贡献, 旋转

风则主要是消耗动能,东移阶段旋转风的消耗抵消了辐散风的制造,使动能制造总量近于零,甚至出现负值。这与文献[1]的结果是一致的。

## 五、讨 论

使用常规探空资料计算动能收支,不可避免地会引入误差,对照 Smith<sup>[7]</sup>给出的误差估计,本文结果是可信的。下面结合大尺度环流形势对计算结果做进一步分析。

1. 高空环流演变与动能平衡型的变化。个例 I 中,200hPa 副热带西风急流在 110°~115°E 范围内维持一个高压脊,只是 2 日 20 时前后上、下游槽分别西退和东移,间距增大到 60 个经度,接近静止波长。由于低层气旋波活动区位于高压脊附近下方,计算区域高层形势基本不变。个例 II 中,200hPa 环流发生明显调整。在生成阶段,110°E 有长波脊发展,低槽位于中亚和日本海;东移阶段这些槽脊稳定少动;其后日本海低槽和上游的脊减弱东移,中亚低槽迅速东移,导致气旋强烈发展。因此,可以认为:环流稳定时,动能平衡型基本不变,而当槽脊系统迅速调整时动能平衡型发生显著变化。

2. 高空急流中心与动能水平输送。动能的水平输入输出主要发生在高层,即高空急流附近(图略)。个例 I 中急流中心始终位于东亚沿岸(即脊的前方),计算区域位于急流入口区的右侧并对应强烈的动能输出。个例 II 的生成、东移和发展阶段,急流中心分别在槽后脊前的黄海上,华北一带高压脊附近和东移低槽的槽后,计算区域分别位于急流中心后方、中心附近和前方,对应的动能水平输送分别为输出,弱输入和强烈输入。

3. 急流的稳定性和旋转风的动能制造。个例 I 中的急流中心,在整个过程中缓慢东移,可以看作是稳定的。个例 II 中的急流中心,实际上是三个互相独立的迅速东移的系统,而在第二阶段中移速较小。由第四节的分析可知稳定急流对应较强的旋转风动能制造(个例 I)或消耗(个例 II 东移阶段),而当急流快速东移时这一分量很小。

4. 气旋发展与动能平衡。两个个例的生成和东移阶段,是较为典型的夏季江淮气旋波。最能表示其发展趋向的动能平衡分量是辐散风的动能制造,它在个例 II 中显著偏大,并集中在高层和低层,中层很小。考虑到气旋波低层和高层分别对应气旋式(低压)和反气旋式环流(高压),这一特征表示低层有水平辐合,高空有水平辐散,因而有利于低层产生正涡度和气压下降。对应的  $\omega$  场上,个例 II 最大上升气流位于气旋中心附近,个例 I 中则明显偏北。这表明,凝结潜热的释放是气旋发展的重要因子。个例 II 的发展阶段,整个对流层内均以气旋性环流为主,与前两个阶段相比最明显的变化是高层气旋式弯曲的急流取代了原来的反气旋式急流。其动能平衡的主要特征是动能的大量输入,与 Petterssen 的 B 型气旋类似。

## 六、小 结

1. 高层形势稳定时,动能平衡变化较小,高层形势迅速变动时,动能平衡也发生变化。
2. 动能的水平输送主要由高空急流完成,急流中心和计算区域的相对位置决定该项符号。

3. 稳定的高空急流对应显著的旋转风动能制造(消耗),并为水平输送项所平衡。
4. 辐散风的动能制造能较好地反映气旋波的发展趋势:当该项在高、低层为较大正值而中层很小时,气旋波缓慢加深。
5. 当与高空槽配合的急流中心移近时,气旋波迅速加深为典型温带气旋,高层表现为动能输入。

### 参 考 文 献

- [1] 谢 安等,梅雨期间次天气尺度扰动的动能收支,气象学报,38,352—358,1980。
- [2] Hou Dingchen. A diagnostic study of two summer depressions over the Changjiang-Huaihe valley. Ph. D thesis, University of Reading, U. K., 1987.
- [3] 侯定臣,夏季江淮气旋的 Ertel 位势涡度分析,气象学报,49,141—150,1991。
- [4] 侯定臣,夏季江淮气旋结构的比较分析,气象科学,即将发表。
- [5] Kung, E. C. and W. W. Baker, Energy transformation in middle latitude disturbances, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 101, 793—815, 1975.
- [6] Pearce, R. P., The design and interpretation of diagnostic studies of synoptic system, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 100, 265—285, 1974.
- [7] Smith, P. J., The energetics of extratropical cyclones, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 18, 378—386, 1980.

## THE KINETIC ENERGY BALANCE OF TWO SUMMER CYCLONES OVER THE CHANGJIANG-HUAIHE VALLEY AND ITS RELATIONS WITH THE LARGE SCALE CIRCULATION

Hou Dingchen

(Nanjing Institute of Meteorology)

### Abstract

In this paper, quasi-lagrangian method is used to calculate the kinetic energy balance and the contribution to the cross contour kinetic energy generation by the rotational and divergent wind components. Their relations with the large scale circulation are also discussed. Main conclusions include: (1) the characteristics of kinetic energy varies according to the large scale circulation; (2) the horizontal transport of kinetic energy is determined by the locations of the cyclone relative to the jet stream; (3) there is large magnitude of kinetic energy generation (destruction) by the rotational wind component near the entrance (exit) region of a stable jet stream; (4) a slowly deepening cyclone wave is associated with significant kinetic energy generation by the divergent wind in the upper and lower layers; (5) the conversion of a summer cyclone wave into a typical extratropical cyclone occurs when an upper level trough with an associated jet stream moves towards the east coast and a large amount of kinetic energy is imported into the cyclone region.